

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. General

En la actualidad la generación de energía eléctrica con ayuda de turbinas eólicas ha tomado relevancia. Por esta razón es importante implementar técnicas que contribuyan a mejorar la eficiencia en el uso de estas máquinas. La velocidad del viento es el factor más importante en la utilización de la energía eólica, sin embargo su naturaleza aleatoria representa un problema, a lo que se suma que se tienen pocos dispositivos lo suficientemente adaptables a estas condiciones que permitan el máximo aprovechamiento de este tipo de energía.

Dentro de la amplia gama de opciones con la que se cuenta actualmente para hacer más eficiente al generador eólico ante las variaciones de la velocidad del viento, se tienen generadores de inducción de doble devanado, que tienen un convertidor de potencia mediante el cual regulan la potencia de salida del generador así como la frecuencia de la señal; en [2] se puede observar un ejemplo del uso de este tipo de máquina eléctrica. También existen medios mecánicos que influyen directamente en la potencia que se obtiene del viento, como lo es variar el ángulo de ataque de los álabes; con la que se regula la velocidad angular de los mismos [3]. Un método utilizado en muchas turbinas de baja velocidad y gran potencia, es una caja multiplicadora de revoluciones; su objetivo es elevar la velocidad angular con la que se excita al generador eléctrico para posicionarlo cerca de su velocidad síncrona.

A lo largo del primer capítulo se describen los fundamentos para entender el funcionamiento de una turbina eólica desde su parte aerodinámica, la cual transfiere la energía cinética del viento hacia el eje. Este se conecta a su vez a un sistema mecánico para optimizar el uso de la energía del viento, y transferirla hacia el generador eléctrico de inducción. De este último se describen sus propiedades y la forma en la que opera para ser utilizado en una región de generación eléctrica.

En el siguiente capítulo se analizan los modelos matemáticos que se utilizarán para representar a cada componente del sistema. Se explicará cómo es que se obtiene cada uno de los modelos, basándose en trabajos anteriores utilizados para diversas aplicaciones.

En el tercer capítulo se propone el diseño del controlador que se encarga de realizar la tarea de regulación de la frecuencia de la señal de voltaje. También se explicarán las consideraciones tomadas sobre las señales que intervienen en el sistema para obtener un control más simple, sin descuidar la calidad del mismo.

El penúltimo capítulo mostrará los resultados obtenidos en la simulación basada en los modelos descritos en el capítulo dos, en conjunto con el controlador diseñado en el capítulo tres. Además se mencionarán las consideraciones que surgen para la aplicación práctica del esquema presentado en esta tesis.

Finalmente se mencionan posibles mejoras, así como las ventajas y desventajas que presenta la estructura sugerida.

## **1.2. Turbina eólica**

Las turbinas eólicas son dispositivos para aprovechar la energía del viento, en dispositivos que pueden ser desde molinos, hasta turbinas para generadores eléctricos. Por medio de estos se genera una gran parte de la energía limpia del planeta. En los últimos años el crecimiento de las turbinas de viento ha tomado un auge impresionante y ha impulsado el estudio y análisis de estos sistemas de generación eólica.

### 1.2.1. Estructura aerodinámica de una turbina eólica

De todas las partes que componen a un generador eólico, la más importante es el sistema de álabes, por medio del cual se transfiere la energía mecánica del viento hacia el eje principal del generador. El diseño aerodinámico de los mismos es el factor fundamental de la eficiencia de la máquina [1].

**Perfil aerodinámico de los álabes** Los álabes de una turbina eólica son básicamente barras asimétricas que se unen al eje de la máquina. Estos poseen una forma asimétrica para mejorar el flujo de aire y aprovechar la energía mecánica del viento al máximo. Poseen un diseño que les permite aumentar su eficiencia y el objetivo principal es producir un efecto de levantamiento, el cual provoca que los flujos de aire alrededor del álabe tengan una dirección apropiada.

### 1.2.2. Conexión entre el generador y los álabes

El sistema que conecta al generador eléctrico incorporado a la turbina con los álabes, se compone de diferentes partes. Dentro de las más relevantes se consideran: el centro al cual se conectan los álabes, el eje principal, el buje de los álabes, el sistema de enganche entre el eje principal y la caja de engranes, el sistema de rodamientos del eje, el sistema de engranes o transmisión mecánica, y el acoplamiento entre la transmisión mecánica y el generador eléctrico [1]

**Buje de los álabes** El centro de rotación de los álabes es una de las partes que más ha evolucionado a lo largo de la historia en su diseño. Esta parte se conecta a los álabes por medio de anillos roscados de acero, aunque en la actualidad en algunos tipos de turbinas eólicas se une por medio de pegamento de alta adherencia. En su mayoría se constituye por hierro fundido, con el objetivo de poder ser moldeado de la mejor forma posible. Un diseño de esta pieza se muestra en la figura 1.1.

**Eje principal** Esta parte de la turbina es una forja de acero de alta dureza, debido a que es este eje el que soporta gran parte de los esfuerzos mecánicos generados por la rotación de los alabes, así como por el impacto del viento y la conexión con el generador.

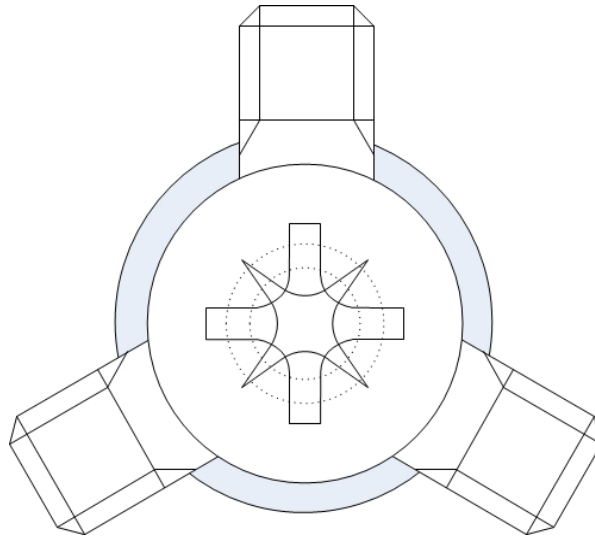


Figura 1.1. Un tipo de diseño del centro de los álabes de una turbina eólica

**Rodamientos** Para reducir la fricción generada durante la rotación de los álabes se colocan rodamientos o baleros, los cuales permiten que el eje principal no eleve su temperatura debido a la fricción y no se desperdicie la energía mecánica transferida por medio de los álabes al eje.

**Sistema de enganche del eje principal y la transmisión mecánica** Por medio del sistema de enganche, el eje principal se une con la transmisión mecánica. Este sistema posee un eje hueco, el cual rodea al eje principal de forma que tenga un buen ajuste. La transferencia de energía cinética se hace por medio de la fricción entre estas dos piezas.

**Sistema de engranes** La intención de colocar un sistema de engranes en un generador eólico es poder tener un mayor número de revoluciones por minuto que las que se tienen a la entrada directamente generadas por el viento. Aunque el par de entrada se ve reducido al aumentar la velocidad de las revoluciones, esto se traduce en una ventaja para el generador eléctrico. La descripción de los diferentes sistemas de engranes que se han incorporado a lo largo de la historia, así como las variantes utilizadas de los mismos se describirán a detalle en la siguiente sección.

**Sistema de acoplamiento entre la caja de engranes y el generador eléctrico.** Permite la unión entre la caja de engranes y el eje del rotor del generador eléctrico mediante piezas que poseen cierta flexibilidad gracias a que utilizan una unión de caucho, esto para ajustarse de alguna forma a las variaciones en la alineación del eje saliente de la caja de engranes con el eje del rotor.

### 1.3. Transmisión de variación continua

La transmisión de variación continua fue conceptualizada por primera vez hace más de 500 años por Leonardo da Vinci. La primera patente de una CVT fue hecha en 1886, con una CVT de tipo toroidal. Esta se fue perfeccionando con los años, siendo usada en un principio en vehículos de baja potencia como motocicletas y motonieves. Con las constantes mejoras que se fueron añadiendo, finalmente la CVT fue instalada en automóviles a mediados del siglo XX. Desde entonces y hasta la actualidad existen diversas compañías automotrices que ofrecen automóviles con este tipo de transmisión, la cual se ha hecho cada vez más popular debido a sus ventajas.

#### 1.3.1. Transmisión mecánica

La función de una transmisión mecánica es la de convertir un par o velocidad angular a otro par o velocidad angular deseado. Esta conversión es necesaria en muchos procesos mecánicos ya que muchas veces nuestra fuente de poder solo maneja cierto rango de par o velocidades que pueden no ser útiles en nuestro proceso. Con el uso de una transmisión podemos convertir dicho par o velocidad al necesario.

La transmisión mecánica transmite potencia, y despreciando las pérdidas, la potencia de entrada se puede considerar igual a la potencia de salida. Esta relación se representa con la siguiente ecuación

$$T_i \omega_i = T_0 \omega_0 \tag{1.1}$$

donde

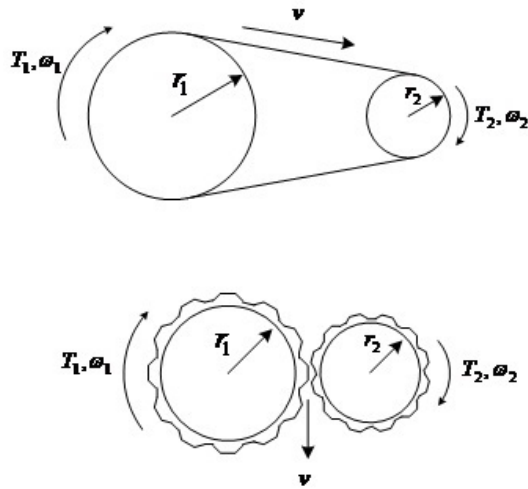


Figura 1.2. Esquema de funcionamiento de las transmisiones mecánicas

$T$ : es el par mecánico.

$\omega$ : es la velocidad angular.

$i$ : representa entrada y el subíndice  $o$  representa salida.

En la figura 1.2 se muestra el esquema de las transmisiones mecánicas más comunes.

La relación entre velocidad lineal y velocidad angular se da mediante la ecuación  $v = \omega r$ . De la figura podemos observar que en cualquiera de los dos casos la velocidad lineal es igual para los dos elementos rotacionales, por lo tanto

$$v = \omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 \quad (1.2)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (1.3)$$

También de la ecuación de transmisión de potencia  $T_1 \omega_1 = T_2 \omega_2$ , obtenemos

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (1.4)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{r_1}{r_2} \quad (1.5)$$

que da una relación inversa a la relación entre las velocidades angulares. Esto quiere decir que si aumentamos la velocidad angular de algún lado de la transmisión, también disminuimos el par de ese mismo lado de la transmisión y viceversa.

### **1.3.2. Tipos de transmisiones mecánicas**

Las transmisiones mecánicas más comunes son aquellas que hacen uso de engranes o cintas para interconectar los elementos rotacionales, aunque también existen otro tipo de transmisiones que transforman el movimiento rotacional a lineal y viceversa, y otras cuyos elementos rotacionales tienen forma diferente a la del disco común, como formas cónicas o esféricas.

### **1.3.3. Trasmisión de variación continua**

Esta transmisión hace uso del mismo principio que las transmisiones convencionales, es decir, convertir la velocidad angular o el par por medio de elementos rotacionales. Lo que hace diferente a esta transmisión es que tiene una relación de transmisión continua dentro de cierto rango. Las transmisiones que hacen uso de engranes tienen una relación de transmisión única por cada par de engranes, por ejemplo 2:1, 3:4, etc. La transmisión de variación continua puede tomar cualquier relación de transmisión dentro de cierto rango. Por ejemplo, si el rango de la CVT es de 0.5:1 a 2:1 podría tomar los valores 0.77:1 o 1.3:1. Esta característica es la que la hace tan atractiva para controlar u optimizar la velocidad.

Aunque dentro de las transmisiones de variación continua (CVT) también existen distintos tipos, la más usada es la que hace uso de poleas de diámetro variable para cambiar la relación de transmisión (ver figura 1.3). La variación del radio de las poleas puede manejarse juntando o alejando dos conos sobre los que se monta la banda que une a las poleas. El movimiento de los conos se logra usando la mayoría de las veces presión hidráulica. La banda que mantiene unidas las poleas es llamada banda V debido a que, haciéndole un corte transversal se observa que tiene forma de V. Esta forma se elige para lograr mayor fricción con la superficie de los conos. Es usada principalmente en automóviles, sustituyendo las clásicas transmisiones manual y automática. Se ha comprobado que al ajustar la relación de transmisión por la óptima dependiendo de la aceleración que se le imprime al auto, este funciona con mayor eficiencia, lo que se traduce en un mayor ahorro de combustible. En la figura 1.4 se muestra una forma diferente de CVT la cual es de

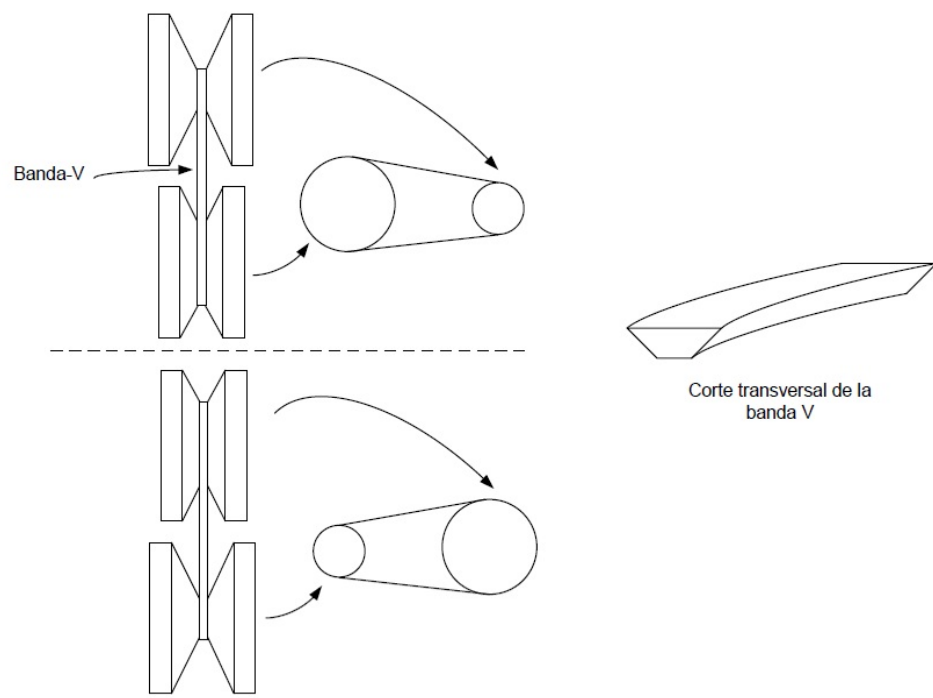


Figura 1.3. CVT a base de poleas de diámetro variable



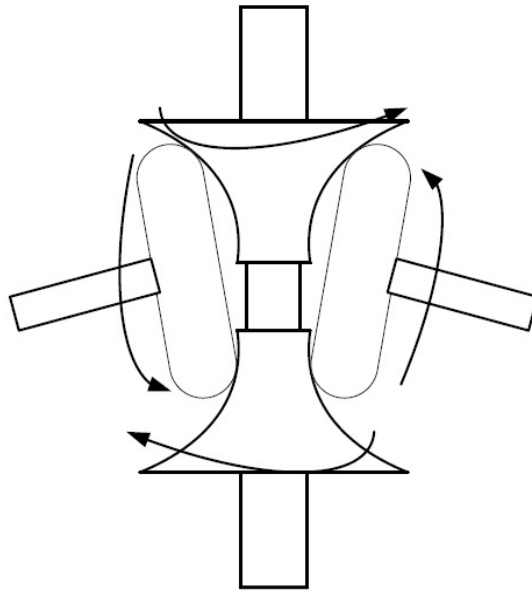


Figura 1.4. CVT tipo toroidal

tipo toroidal.

## 1.4. Generador eléctrico

La observación de los fenómenos electromagnéticos se remonta varios siglos atrás, sin embargo, el uso de los conocimientos adquiridos de esta observación se dio en el siglo XIX cuando Michael Faraday creó el primer generador eléctrico, una máquina capaz de convertir la energía mecánica en energía eléctrica [6]. Este hecho dio inicio a uno de los avances más importantes en la tecnología pues con esto se comenzó una carrera por mejorar las formas de generación de energía eléctrica. En el año 1889 se creó la primera máquina de inducción polifásica, diseñada por Nicola Tesla [7].

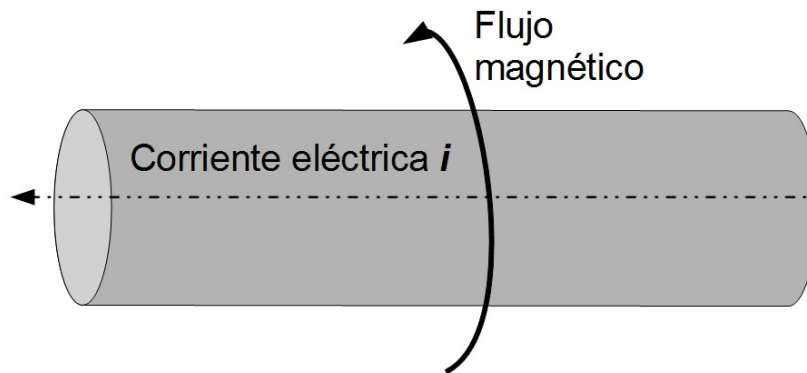


Figura 1.5. Ejemplo de la inducción de un flujo magnético en un conductor por el cual se hace pasar una corriente eléctrica

#### 1.4.1. Conversión de energía

La conversión de un tipo de energía en otra se lleva a cabo en diferentes formas. Algunas de ellas son la conversión de energía química en energía térmica que se puede observar en una reacción exotérmica, la cual libera calor cuando se lleva a cabo la reacción. En un motor de combustión interna, la explosión de un combustible, que puede ser gasolina, genera un incremento de presión a su alrededor y con ello se genera una fuerza que mueve un pistón. Esta es una conversión de energía química en energía térmica y luego en energía mecánica. Por ahora, la conversión que se explicará es la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica, la cual se efectúa mediante una máquina eléctrica.

Para poder entender el funcionamiento de una máquina eléctrica, es indispensable entender el funcionamiento de un circuito electromagnético debido a que éste es el fundamento de la operación de una máquina eléctrica.

La explicación de la conversión de energía mecánica en energía eléctrica inicia con la explicación del funcionamiento de un inductor, el cual es un elemento que genera un campo magnético a partir de una corriente eléctrica. En la figura 1.5 se observa un conductor recto por el cual circula una corriente eléctrica, que a su vez induce un campo magnético a su alrededor. Dentro de las investigaciones de campos magnéticos desarrolladas por Ampere se encuentra un aporte muy útil, el cual se muestra en la siguiente ecuación.

$$dB_P = \frac{\mu_0 \mu_r I \cos \alpha dl}{4\pi r^2} \quad (1.6)$$

donde

$dB_P$ : diferencial de densidad de flujo magnético en un punto P [ $\frac{\text{webers}}{\text{m}^2}$ ].

$\mu_0$ : permeabilidad del espacio libre [ $\frac{\text{webers}}{\text{m A}}$ ].

$\mu_r$ : permeabilidad relativa del medio en el sistema bajo consideración.

$r$ : radio del conductor.

$I$ : corriente [A].

$dl$ : diferencial de longitud del conductor.

$\alpha$ : Angulo entre r y dl [rad].

Para un conductor recto muy largo la expresión se reduce debido a que el ángulo  $\alpha$  es nulo, la simplificación queda mostrada en la siguiente ecuación.

$$dB_p = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} \quad (1.7)$$

La densidad de flujo magnético en un punto en el espacio generado por una corriente que circula por un conductor recto, el cual pasa por un campo magnético que puede estar generado por un imán permanente o un electroimán[4]. Este flujo magnético inducido por la corriente en conjunto con el campo magnético por el cual cruza el conductor generan una fuerza, la cual es de mucho interés pues es la base del movimiento de la maquina eléctrica. En la figura 1.6 se puede observar un ejemplo de lo antes explicado.

Si consideramos el efecto que tiene un inductor al generar un campo magnético, el cual puede ser controlado por la corriente que pasa por el conductor que conforma este dispositivo, es posible establecer la forma de funcionamiento de una máquina eléctrica. Sin embargo, es importante resaltar más el funcionamiento de un circuito magnético pues este es el que constituye gran parte de una máquina eléctrica o electromagnética, ya que por su naturaleza, ésta es una combinación de circuitos magnéticos y eléctricos.

En la figura 1.7 se muestra la forma en la que el campo magnético se comporta en un inductor el cual es un solenoide de núcleo de hierro.

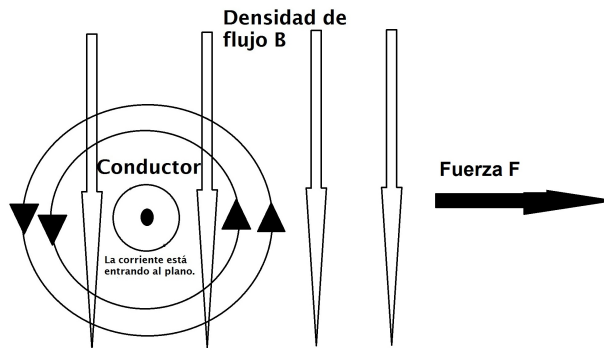


Figura 1.6. En la figura se representa la dirección de la fuerza generada por el campo magnético

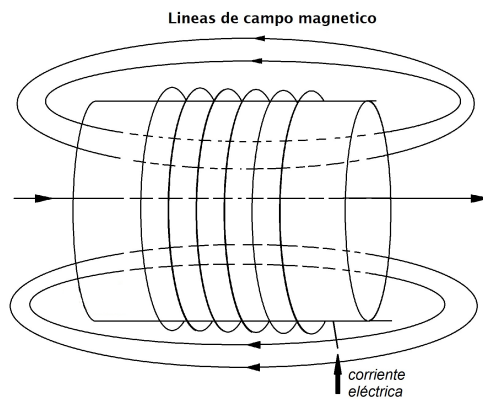


Figura 1.7. Campo magnético generado en un solenoide

### 1.4.2. Energía almacenada en un circuito magnético

Es importante analizar la energía almacenada en un campo magnético, ya que mediante esta es posible desplazar una masa  $m$  una distancia  $x_0$  lo cual se convierte en un trabajo, y es el principio de funcionamiento de una máquina eléctrica rotacional. citeThaler. La fuerza magnetomotriz que ejerce el campo sobre dicha masa y el trabajo realizado se puede expresar como

$$W = \int NI d\phi \quad (1.8)$$

si se considera que el trabajo es realizado por una fuerza a lo largo de una distancia esto puede ser expresado en la ecuación (1.9), y en ella se observa que la fuerza puede ser una relación entre el trabajo realizado y el desplazamiento, con ello se llega la ecuación (1.10).

$$f dx = dW \quad (1.9)$$

$$f = \frac{dW}{dx} \quad (1.10)$$

Una ecuación muy útil, que define la relación entre el trabajo realizado por un campo magnético en función de la corriente con la que se excita al circuito y la autoinductancia del mismo, es:

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (1.11)$$

En conjunto con la ecuación (1.9) se tiene como resultado

$$dW = LI dI + \frac{1}{2} I^2 dL \quad (1.12)$$

De la ecuación (1.12) se pueden definir un par de casos en los cuales una variable permanece constante. En el primero se puede tener un flujo constante, para lo cual  $dL=0$ , por lo cual la ecuación (1.12) se reduce a

$$dW = LI dI = f dx \quad (1.13)$$

Sin embargo, debido a que la corriente es más fácil de manipular que el flujo en un circuito electromagnético, el segundo caso es cuando la corriente es constante, es decir  $dI=0$ . El resultado de este caso se describe en la ecuación (1.14), y en conclusión esta es la ecuación que puede definir el trabajo que ejerce un campo magnético sobre un cuerpo en función de una corriente constante

$$dW = \frac{1}{2} I^2 dL \quad (1.14)$$

Es importante tener una ecuación que describa el comportamiento de la fuerza como una función de la corriente, del flujo y también de la distancia que se desplaza el cuerpo sobre el que se ejerce la fuerza. Dicha ecuación es

$$f = LI \frac{dI}{dx} + \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx} \quad (1.15)$$

Por medio de las ecuaciones descritas en esta sección se tiene un mejor panorama sobre el funcionamiento de un circuito magnético, y la manera en la que éste ejerce una fuerza sobre un cuerpo. En la siguiente sección se discutirá el funcionamiento de una máquina eléctrica.

### 1.4.3. Máquina electromagnética

Es un circuito magnético que posee varias secciones de entrehierro o espacios de aire entre materiales de alta permeabilidad magnética, donde se tiene a un inductor excitado. Las fuerzas que se generan en el circuito magnético son muy variadas y

se presentan en diferentes partes del mismo. Estas fuerzas se pueden determinar por la cantidad de energía que se almacena en forma de campo magnético en los devanados. Suponiendo una máquina eléctrica con una excitación simple, como la mostrada en la figura 1.8, en la que se observa una máquina giratoria, ésta tendrá un desplazamiento angular  $\theta$ , y la variación de la reluctancia en este giro, puede ser determinada por

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (1.16)$$

Donde  $l$  es una función de  $\theta$ ,  $l = l_{max} \text{sen}\theta$ .

Como consecuencia de esto, la ecuación que describe la reluctancia a lo largo del desplazamiento  $\theta$  está dada por

$$R = \frac{l_{max} \text{sen}\theta}{\mu A} \quad (1.17)$$

Por medio de algunos cambios en las variables de la ecuación (1.11), y considerando la ecuación (1.18), se puede llegar a

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (1.18)$$

$$W = \frac{N^2 I^2 \mu A}{4 l_{max} \text{sen}\theta} \quad (1.19)$$

De la ecuación (1.19) se puede obtener una diferencial de trabajo  $dW$ . Si se considera un diferencial de desplazamiento  $d\theta$  debido a una fuerza se obtiene

$$dW = \frac{N^2 I^2 \mu A}{2 l_{max} \text{sen}\theta} dI + \frac{N^2 I^2 \mu}{4 l_{max} \text{sen}\theta} dA + \frac{\cos\theta N^2 I^2 \mu A}{4 l_{max} \text{sen}^2\theta} d\theta \quad (1.20)$$

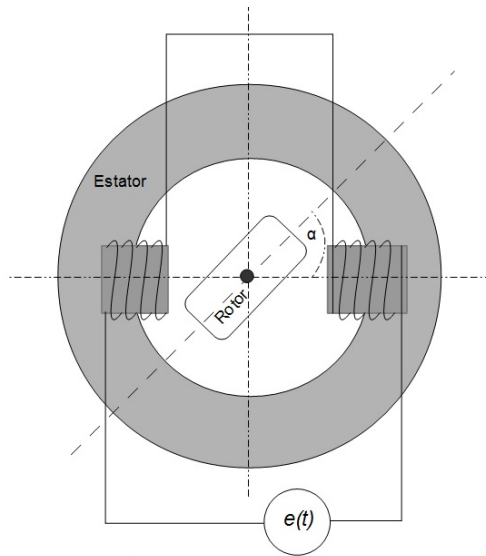


Figura 1.8. Representación de una máquina eléctrica de forma simplificada, con un solo devanado

De los tres términos que componen la ecuación (1.20) se pueden suprimir algunos, por ejemplo, si la corriente del circuito mostrado en la figura 1.8 se hace constante el primer término de la ecuación desaparecerá.

Para un circuito como el mostrado en la figura 1.9 las condiciones de operación son muy similares, esto si se consideran materiales ideales los cuales no tienen saturación magnética. De este modo, la operación de la primera bobina (estator) se puede describir con las ecuaciones del circuito mostrado en la figura 1.8, y los efectos provocados por el segundo devanado (rotor), tienen mucha similitud al primer devanado, así el par con el que se impulsa la máquina se incrementa.

#### 1.4.4. Analogía con un transformador

Un generador eléctrico puede ser analizado como un transformador, si se considera que en un generador eléctrico uno de los dos devanados, que puede ser visto como primario, tiene movilidad. A este se le conoce como rotor, que es regular-



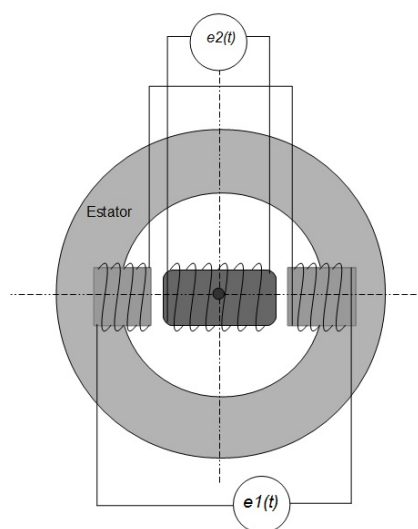


Figura 1.9. Representación de una máquina eléctrica de forma simplificada, con doble devanado

mente de forma cilíndrica, y está cubierto por un cilindro hueco concéntrico al mismo, el cual puede ser visto como el devanado secundario y al que se le conoce como estator. Una diferencia muy importante entre un generador eléctrico y un transformador es el acoplamiento magnético que tienen ambas máquinas. Un transformador está acoplado magnéticamente entre sus devanados por un material que tiene una alta permeabilidad magnética, y un generador eléctrico tiene entre el estator y el rotor un anillo de aire, conocido como entrehierro. En la figura 1.10 se puede observar la analogía explicada anteriormente.

### 1.4.5. Tipos de generadores eléctricos

En la actualidad existen diferentes formas de generar energía eléctrica así como para poder aprovecharla. En la mayoría de los casos la manera en la que se genera es mediante una máquina rotatoria (generador eléctrico) de la cual existen diferentes tipos de acuerdo a la necesidad de uso. Por medio de una máquina rotatoria eléctrica también se puede aprovechar la energía eléctrica convirtiéndola en energía mecánica. Los generadores eléctricos se pueden dividir en dos grandes

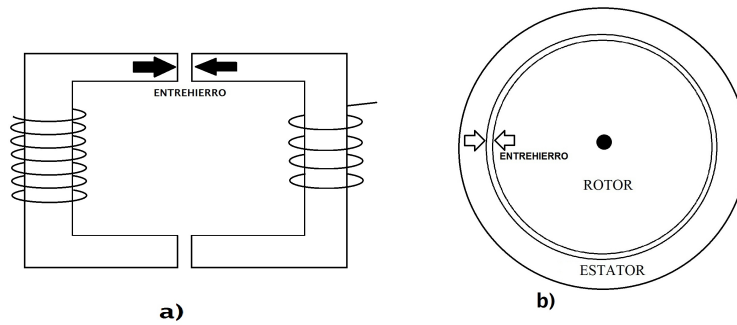


Figura 1.10. Esquema de un generador eléctrico en una comparativa con un transformador de una ventana, a) transformador de ventana, b) generador eléctrico

categorías que son los generadores síncronos y generadores asíncronos. Dentro de esta última categoría se puede ubicar a los generadores de corriente continua, los cuales poseen un dispositivo llamado conmutador con el cual se genera una señal pulsante de una sola polaridad y de esta manera se obtiene la corriente continua o de una sola polaridad. Las máquinas de inducción son comúnmente utilizadas como motores, y las máquinas síncronas son en su mayoría generadores eléctricos, aunque la selección específica puede variar según la finalidad.

## Generadores Síncronos

El generador síncrono es el tipo más usado en la generación de energía eléctrica, ya que su eficiencia es mayor que la de los generadores asíncronos cuando aumenta la cantidad de energía a generar.

Está compuesto de los mismos elementos que el generador asíncrono, un rotor y un estator. La diferencia está en el rotor, que está compuesto de un devanado, comúnmente llamado de excitación, que constantemente está generando un campo magnético y que además siempre está girando a la velocidad síncrona de la máquina. El campo magnético generado en el rotor se crea ya sea mediante un devanado alimentado con corriente directa o mediante un imán permanente, siendo más común el devanado, debido a que el imán puede perder su magnetismo debido a los otros campos magnéticos generados en la máquina. Cuando el rotor gira se crea un campo magnético giratorio que induce un conjunto de voltajes, trifásicos comúnmente, en los devanados del estator.

La alimentación de corriente directa del devanado del rotor se hace por medio de escobillas y anillos rozantes, y un circuito que está fijo en el eje del rotor. El inconveniente de las escobillas y los anillos rozantes es el desgaste lo cual provoca más mantenimiento, por lo que se suele preferir el circuito fijo al eje del rotor.

Se puede considerar al rotor como un electroimán. Los polos magnéticos son una de las características principales de la máquina, ya que la frecuencia con la que se generan los voltajes inducidos está en función de estos. Para ilustrar lo anterior se puede considerar un maquina con dos polos (norte y sur). Al girar el rotor una vuelta completa se habrá completado un ciclo del voltaje con forma senoidal, y la frecuencia de dicha onda estará en función de la velocidad del rotor, por lo que se obtiene la ecuación (1.21)

$$f_e = \frac{nP}{2} \quad (1.21)$$

donde

$f_e$ : es la frecuencia eléctrica [Hz].

$n$ : es la velocidad del rotor en revoluciones por segundo.

$P$ : es el número de polos.

Usando revoluciones por minuto en la velocidad del rotor la ecuación (1.21) se convierte en (1.22)

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (1.22)$$

donde

$n_m$ : es la velocidad del rotor en revoluciones por minuto.

De la ecuación (1.21) se puede observar que aumentando la cantidad de polos de la máquina se logra una frecuencia mayor con una misma velocidad del rotor. La forma del voltaje generado así como el ángulo de desfaseamiento entre cada onda de voltaje inducido depende de la construcción de la máquina. Así, para una máquina trifásica los devanados de cada fase deben estar colocados de forma que los voltajes inducidos en cada fase tengan un desfaseamiento de  $120^\circ$  eléctricos con la fase siguiente. Esto no quiere decir que físicamente cada fase se encuentre a  $120^\circ$

de separación. El voltaje generado depende del flujo en la máquina, de la velocidad del rotor y de la construcción de la máquina, y está dado por

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \varphi f \quad (1.23)$$

donde

$E_A$ : Voltaje generado.

$N_c$ : Número de vuletas de conductor en el devanado.

$\varphi$ : Flujo magnético.

$f$ : Frecuencia del voltaje.

Debido a que el flujo depende directamente de la corriente de magnetización, el voltaje inducido también depende de esta. Haciendo uso de la figura 1.12, se analizará la forma en la que se obtiene el voltaje de fase de un generador síncrono. Considerando que el rotor gira en sentido contrario al de las manecillas del reloj y generando un campo magnético  $B_r$  con valor máximo indicado por la flecha, se induce un voltaje en los devanados del estator. Si no existe carga en el estator el voltaje de fase será igual al voltaje inducido.

Cuando se conecta una carga a los devanados del estator comienza a circular una corriente por ellos, la cual a su vez tiene un campo magnético asociado, mostrado en la figura 1.11 como  $B_s$ . La suma de este campo magnético con el campo magnético del rotor origina el campo magnético neto  $B_{net}$ , que es el que finalmente induce el voltaje de fase. Con el diagrama fasorial, en la figura 1.12, podemos observar como se calcula el voltaje de fase  $V_\phi$  con base en el voltaje inducido y la impedancia del estator.

## Generadores de inducción

La mayoría de las máquinas eléctricas que se utilizan en el hogar y en accionadores mecánicos basados en energía eléctrica, los cuales suelen ser utilizados en la industria, son máquinas de inducción. Desde pequeñas máquinas de una sola fase eléctrica hasta las máquinas polifásicas de varios miles de caballos de potencia son máquinas eléctricas de inducción. Las causas de este uso tan extenso en diferentes aplicaciones, ya sean industriales o incluso domésticas, son la facilidad

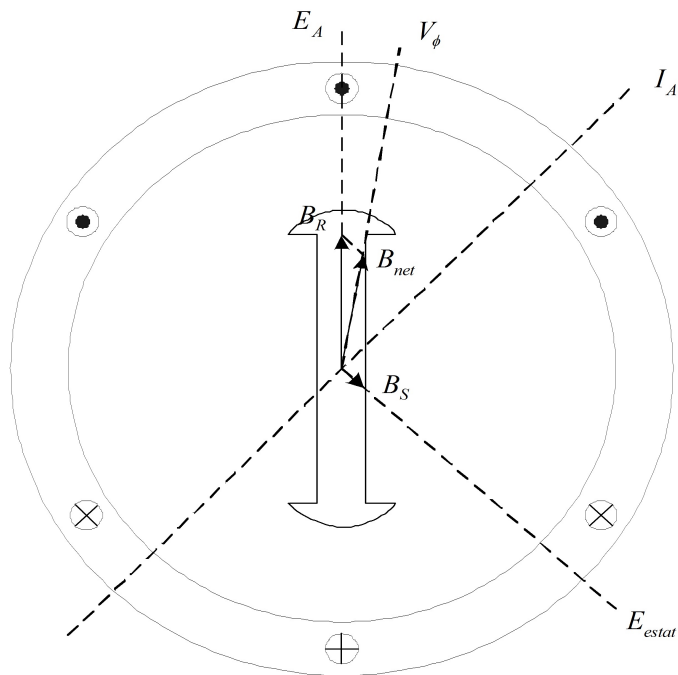


Figura 1.11. Esquema de un generador síncrono y los campos magnéticos que interactúan

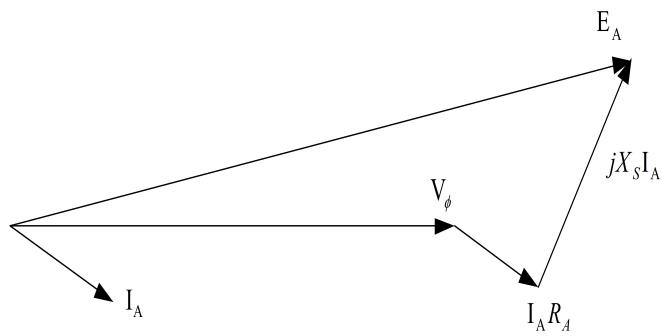


Figura 1.12. Diagrama fasorial del voltaje generado por fase a partir del voltaje inducido y las pérdidas por impedancia del estator

de construcción de esta máquina además de un muy reducido costo y una gran capacidad de ser adecuada a un uso específico.

**Características de construcción.** Es sabido que las máquinas eléctricas poseen un entrehierro, algunas de ellas tienen en su construcción devanados los cuales son nombrados polos salientes, los cuales hacen que el entrehierro no sea un anillo uniforme de aire. En la máquina de inducción no suelen utilizarse este tipo de entrehierros pues se trata de buscar que el entrehierro sea lo más uniforme posible; esto se logra mediante un núcleo (estator) hecho a base de láminas de acero dentro de las cuales se colocan los devanados. En el estator se colocan de manera similar las bobinas de forma que ambas estructuras sean cilindros casi lisos. Existen dos tipos de máquinas de inducción, la primera es llamada *jaula de ardilla* en la cual el rotor se conforma por barras de aluminio o cobre y estas se encuentran en corto circuito en el extremo, de esta manera se inducen corrientes en el rotor por medio del campo en el estator y ambos campos interactúan para poder producir el giro del rotor. Esta arquitectura en la construcción del rotor permite un manejo de grandes corrientes y por ende un gran par mecánico. La máquina de inducción de rotor bobinado, es similar a la máquina de inducción de jaula de ardilla sin embargo esta tiene en su rotor devanados los cuales se conectan a anillos metálicos colocados en los extremos del mismo con el propósito de que esta parte de la máquina pueda ser conectada a un circuito externo, como un arreglo de resistencias con la finalidad de regular su velocidad.

**Características de funcionamiento.** La operación de una máquina de inducción se puede analizar considerando una máquina trifásica cuyo esquema simplificado se puede observar en la figura 1.13, en la cual las bobinas de cada letra representan una fase eléctrica y físicamente se encuentran desfasadas  $120^\circ$  grados. En cada una de estas bobinas se genera un campo magnético, el cual para una corriente alterna se genera de forma senoidal. De esta forma se genera un campo magnético que gira respecto del tiempo por medio del estator de la máquina, lo que provoca el giro del rotor, cuando la máquina se encuentra operando como motor. La velocidad a la que puede girar una máquina de inducción está en función de la frecuencia de la fuente con la que se alimenta al circuito, así como del número de polos con los que cuenta la máquina, esto se puede observar en la ecuación (1.24)

$$n = \frac{120f}{p} \quad (1.24)$$

donde

$n$ : velocidad síncrona de la máquina.

$p$ : número de polos por fase.

$f$ : frecuencia de la fuente de alimentación.

**Modos de operación.** La máquina de inducción puede operar de diferentes formas; la operación como motor es una de ellas aunque también puede operar como generador eléctrico, ambas formas de operación serán discutidas a continuación.

**Motor de inducción.** Una máquina de inducción puede funcionar como motor, en cuanto se conecta los devanados del estator a una fuente de alimentación, con ello se genera un campo magnético variable en el tiempo (para corriente alterna), y se comienza a mover el rotor. Esta puede considerarse la forma natural de operación de una máquina de inducción sin embargo su estructura permite otras formas de operación.

**Generador de inducción.** Otro modo de operación de una máquina de inducción, es observado cuando la máquina comienza a girar a una velocidad mayor a su velocidad nominal, y además el giro del rotor se da en la misma dirección que el campo magnético giratorio del estator. Cuando pasa lo anterior la máquina de inducción producirá un torque que se opone al giro del estator, este es conocido como un torque de generación. De esta forma se puede utilizar una máquina de inducción como generador eléctrico el cual puede tener una frecuencia variable.

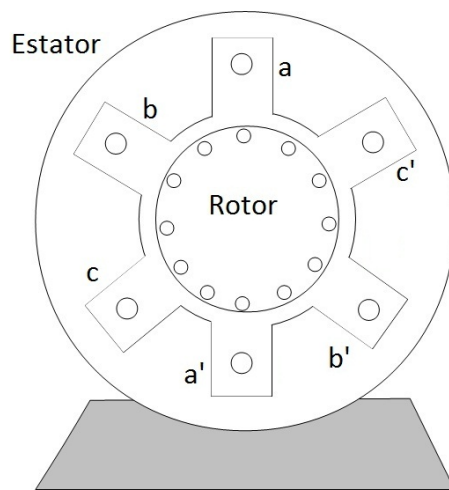


Figura 1.13. Esquema simplificado de una maquina de induccion trifasica